

## The utility of marine controlled-source EM in subduction zone applications: Imaging the Nicaragua megathrust plate interface

\*Samer Naif<sup>1</sup>, Kerry Key<sup>2</sup>, Steve Constable<sup>2</sup>, Rob L Evans<sup>3</sup>

1. Lamont Doherty Earth Observatory, 2. Scripps Institution of Oceanography, 3. Woods Hole Oceanographic Institution

Electrical resistivity soundings are ideally suited to map fluids and quantify porosity, and provide important independent constraints that are complimentary to seismic observations. As a result of recent technological advancements in instrumentation and numerical modeling, the controlled-source electromagnetic (CSEM) method is emerging as a reliable tool for imaging offshore tectonic margins. In 2010, we collected CSEM data along a 280 km profile spanning the incoming plate, trench, and forearc slope offshore of Nicaragua, the first large-scale survey at a subduction zone. The results highlight the utility of CSEM for imaging seafloor gas hydrates, fluid pathways along faults, and subducted sediments marking the plate interface. We used the porosity estimates from the resistivity observations to quantify the fluid budget in the incoming oceanic crust and the outer forearc. The data were highly sensitive to the channel of subducted sediments, allowing us to track the evolution of the fluid budget along the megathrust plate interface in the region that ruptured during the Mw 7.7 1992 tsunami earthquake.

## Sensitivity analysis of high conductivity anomalies in the upper mantle beneath the Society hotspot

\*多田 訓子<sup>1,3</sup>、Tarits Pascal<sup>2</sup>、馬場 聖至<sup>3</sup>、歌田 久司<sup>3</sup>、末次 大輔<sup>1</sup>

\*Noriko Tada<sup>1,3</sup>, Pascal Tarits<sup>2</sup>, Kiyoshi Baba<sup>3</sup>, Hisashi Utada<sup>3</sup>, Daisuke Suetsugu<sup>1</sup>

1. 海洋研究開発機構、2. IUEM、3. 東京大学地震研究所

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. IUEM, 3. The University of Tokyo

We obtained a three-dimensional (3-D) electrical conductivity image of the upper mantle around the Society hotspot in French Polynesia, and we have found four high electrical conductivity anomalies in the upper mantle. One of them has already been introduced in Tada et al. (2016), which is a distinct high electrical conductivity anomaly and may be continued from the transition zone up to at a depth of approximately 50 km below the sea level. Although the other conductive structures have not been mentioned in Tada et al. (2016), they are also distinct features. Besides, collaborating with results from seismic tomography (Isse et al., 2016; Obayashi et al., 2016), it is crucial to check sensitivity and validity of each anomaly. So, in this presentation, we will present detail procedures for obtaining the 3-D electrical conductivity structure and discuss what we really constrain in the 3-D structure.

キーワード：3Dインバージョン解析、海底マグネトテルリック法、電気伝導度構造、マンテルプルーム、ソサエティ・ホットスポット

Keywords: 3D inversion, marine magnetotelluric method, electrical conductivity structure, mantle plume, Society hotspot

## Noise reduction of horizontal components of magnetic field by means of Independent Component Analysis and its application to the Magnetotelluric survey in Boso peninsula

## Noise reduction of horizontal components of magnetic field by means of Independent Component Analysis and its application to the Magnetotelluric survey in Boso peninsula

\*奥田 真央<sup>1</sup>、Mogi Toru<sup>2</sup>、Hattori Katsumi<sup>3</sup>、Koizumi Naoki<sup>3</sup>、Yoshino Chie<sup>3</sup>、Han Peng<sup>4</sup>、Chen Hao<sup>3</sup>、早川 美土里<sup>1</sup>、菅野 倅大朗<sup>1</sup>

\*Mao Okuda<sup>1</sup>, Toru Mogi<sup>2</sup>, Katsumi Hattori<sup>3</sup>, Naoki Koizumi<sup>3</sup>, Chie Yoshino<sup>3</sup>, Peng Han<sup>4</sup>, Hao Chen<sup>3</sup>, Midori Hayakawa<sup>1</sup>, Kotaro Sugano<sup>1</sup>

1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Division of Sustainable Resource Engineering, Faculty of Engineering, Hokkaido University, 3. Graduate School of Science, Chiba University, 4. The Institute of Statistical Mathematics, Tokyo, Japan

1. Graduate School of Science, Hokkaido University, 2. Division of Sustainable Resource Engineering, Faculty of Engineering, Hokkaido University, 3. Graduate School of Science, Chiba University, 4. The Institute of Statistical Mathematics, Tokyo, Japan

We carried out a MT survey in the Boso peninsula (Chiba, Central Japan) to investigate the resistivity structure of the area where the slow slip events have occurred at least five times within 20 years. Large artificial noise contaminated in the MT data and the resistivity and phase showed near field effect at the frequency band below 1Hz. To avoid the local noise, we attempted to apply the independent component analysis (ICA).

ICA is one of the multivariate analysis methods and in which complicated data sets can be separated into all underlying sources without knowing these sources or the way that they are mixed. It assumes that the mixing is linear, and yields the relation  $x(t)=As(t)$ , where input signals  $x(t)$ , mixing matrix  $A$  and source signal  $s(t)$ . The matrix  $W(=A^{-1})$  is computed in the ICA. In this study, we used the frequency domain ICA program for complex signals to deal with the phase part. This is an extension of FastICA algorithm which was introduced by Aapo and Hyvärinen (2001) and is based on a fixed-point iteration scheme for complex valued signals.

We applied the ICA method to improve horizontal magnetic components in MT data. Two components of ICA using both the data observed in Boso area and the noise free magnetic data observed in Esashi, Sawauchi or Kakioka Magnetic Observatory was applied for each magnetic component. The magnitude of magnetic intensity varies over large ranges in wide frequency band. To work ICA effectively, we needed to divide into narrow frequency bands and applied the ICA at each band. After applying ICA, in order to extract noise free component which showed high correlation with data in noise free site, we kept the noise free component and set to 0 in other noise component. Then we applied inverse matrix of  $W$  to obtain original  $x$ , i.e.  $x(t)=W^{-1}u'(t)$ , where  $u'(t)$ : components vector after ICA,  $x(t)$ : the original data vector. Finally, we used the BIRRP processing to calculate the apparent resistivity using improved horizontal magnetic components.

After the ICA processing, the apparent resistivity showed gentle change and the phases take non-zero values. This result meant that some parts of the noise components such as near field noise were removed. These results revealed that ICA has a potential to handle noisy data. But, the ICA processing not every frequency band worked effectively and the horizontal magnetic components were well improved by the

conventional remote reference method. Finally, the most suitable apparent resistivity and phases were chosen for each frequency band from the results of both methods.

We estimated the resistivity structure using the improved data and discussed the structures in relation to geological structure and the presence of fluid.

キーワード : MT methods、 Magnetotelluric、 independent component analysis

Keywords: MT methods, Magnetotelluric, independent component analysis

## MT法による房総半島の地下比抵抗構造探査に関する研究

### ～MSSAによる前処理の効果～

## MT survey at Boso Peninsula, Japan and its preliminary results

### -Effectiveness of Multi-channel Singular Spectral Analysis (MSSA)-

\*小泉 直輝<sup>1</sup>、陳 浩<sup>1</sup>、吉野 千恵<sup>1</sup>、服部 克巳<sup>1</sup>、韓 鵬<sup>2</sup>、奥田 真央<sup>3</sup>、菅野 倭大朗<sup>3</sup>、早川 美土里<sup>3</sup>、茂木 透<sup>4</sup>、坂中 伸也<sup>5</sup>

\*Naoki Koizumi<sup>1</sup>, Hao Chen<sup>1</sup>, Chie Yoshino<sup>1</sup>, Katsumi Hattori<sup>1</sup>, Peng Han<sup>2</sup>, Mao Okuda<sup>3</sup>, Kotaro Sugano<sup>3</sup>, Midori Hayakawa<sup>3</sup>, Toru Mogi<sup>4</sup>, Shin'ya Sakanaka<sup>5</sup>

1. 千葉大学大学院理学研究科、2. 統計数理研究所、3. 北海道大学大学院理学院、4. 北海道大学大学院工学研究院環境循環システム部門、5. 秋田大学大学院工学資源学研究科地球資源学専攻

1. Graduate School of Science, Chiba University, 2. The Institute of Statistical Mathematics, Tokyo, Japan, 3. Graduate School of Science, Hokkaido University, 4. Division of Sustainable Resource Engineering, Faculty of Engineering, Hokkaido University, 5. Department of Earth Science and Technology, Graduate school of Engineering and Resource Science, Akita University

本研究では、地磁気地電流法(MT法)による房総半島全域の地下比抵抗構造探査を試みた。本研究の目的は以下のとおりである。(1)電磁学的に房総半島全域の地下比抵抗構造を推定することである。特にプレート境界等の地下比抵抗構造を推定することが地学的なテーマである。(2)ULF帯等の地震電磁気現象が観測された場合、波の発生および伝播機構を調査するための基礎資料を得ることである。波の発生および伝播機構の解明には、波動の伝播シミュレーションが必要不可欠である。伝播シミュレーションには地下の比抵抗構造が重要であり、現実的な結果を得るためには観測データに基づくデータが必要である。(3)人工雑音が多く含まれる地域でMT探査が可能になる、新たな信号処理手法の開発である。関東地域では堆積層が厚く、また、直流電車や工場等からの漏洩電流の影響で、観測されるデータに雑音が多い。そのため、従来MT探査が敬遠されてきた。これらの雑音はどの周波数にも乗るため、周波数領域で行うMT解析では除去することが困難であった。時間領域において雑音を除去する新たな取り組みが必要であり、今回取得するデータを用いてその手法と効果について述べる。

以上の目的のため、2014年11月から2015年3月にかけて房総半島の北部を対象とし、2015年11月から2016年1月にかけて房総半島の南部を対象としてMT探査を実施した。観測点は緯度経度ごとに41箇所設けた。全観測点においてPhoenix Geophysics社のMTU-5, 5A, netを用い、サンプリング周波数15, 150, 2400 Hzのデータを観測した。これらのデータから約0.003 s -3,000 sのMTインピーダンスを推定する。41箇所の観測点の内12箇所ではテラテクニカ社のU-43も用い、サンプリング周波数1 Hzのデータを観測した。これらのデータから約20 s -15,000 sのMTインピーダンスを推定する。

MT法により房総半島全域の地下比抵抗を推定するためには、電磁場に影響するコヒーレント/インコヒーレントノイズを除去する手法が必要となる。ノイズを除去するため、まず従来の周波数領域の手法であるリモートリファレンス法を試みたところ、房総南部のMTインピーダンスは多少の改善が見られたものの、北部のMTインピーダンスは改善が見られなかった。そこで、時間領域で処理を行うマルチチャンネル特異スペクトル解析 (Multichannel-Singular Spectrum Analysis: MSSA) を長期観測点と参照点のMTデータに適用し、S/N比を改善する新たな試みを行った。MSSAによって元の時系列を特異値分解し、観測点と参照点の水平磁場で相対的に高い相関係数を示す主成分を用いて時系列を再構成したところ、リモートリファレンス法で見られる異常値を抑制できることがわかった。このことは、時間領域におけるMTデータの前処理の有効性および有望性を示すと考えられる。

長期観測点の再構成時系列にリモートリファレンス法を用いて房総半島の南西から北東方向の地下比抵抗断面を算出したところ、地下約1-2 kmには0.1-10 Ωmの低比抵抗領域が存在した。これは房総半島の地表の大部分を覆う堆積層に含まれる流体の影響と考えられる。南西方向の地下では最深部で約10 kmまで0.1-10 Ω

mの低比抵抗領域が存在するが、超苦鉄質岩類または沈み込む海山によって押し上げられた付加体の影響を反映した領域である可能性がある。

## 山崎断層系大原断層の地下比抵抗構造の再評価

### Reevaluation of resistivity structure beneath the Ohara fault of the Yamasaki fault zone, southwest Japan

小堺 航<sup>1</sup>、\*山口 覚<sup>2</sup>、倉光 伸<sup>2</sup>、三村 明<sup>1</sup>、村上 英記<sup>3</sup>、加藤 茂弘<sup>4</sup>、上嶋 誠<sup>5</sup>

Ko Kozakai<sup>1</sup>, \*Satoru Yamaguchi<sup>2</sup>, Shin Kuramitsu<sup>2</sup>, Akira Mimura<sup>1</sup>, Hideki Murakami<sup>3</sup>, Shigehiro Katoh<sup>4</sup>, Makoto Uyeshima<sup>5</sup>

1. 大阪市立大学理学部、2. 大阪市立大学大学院理学研究科、3. 高知大学教育研究部 自然科学系理学部門、4. 兵庫県人と自然の博物館、5. 東京大学地震研究所

1. Department of Geosciences, Faculty of Science, Osaka City University, 2. Department of Geosciences, Graduate School of Science, Osaka City University, 3. Research and Education Faculty, Kochi University, 4. Division of Natural History, Hyogo Museum of Nature and Human Activities, 5. Earthquake Research Institute, Tokyo University

山崎断層帯は、岡山県東部から兵庫県西南部にわたり、北から那岐山断層帯、山崎断層帯主部、草谷断層の3つの起震断層に区分される活断層帯である。このうち、山崎断層帯主部は、最新活動時期と平均変位速度の違いから、大原断層、土万断層、安富断層、暮坂峠断層からなる北西部と、琵琶甲断層および三木断層からなる南東部に区分される(地震調査研究推進本部地震調査委員会、2013)。

山崎断層帯主部では、断層セグメント個々の地下構造やそれらが互いにどのように連続しているかを明らかにすることを目的として、Audio-frequency Magnetotelluric (AMT) 法探査が展開されている (e.g. Yamaguchi *et al.*, 2010)。ここでAMT法とは、地磁気地電流法の一つで、比較的高い周波数(数Hz~約10kHz)の電磁場変動を信号源とし、地下浅部を高い空間分解能で描出できる手法である。

山崎断層帯主部の北西端に位置する大原断層では、上田ら(2009;2011)が、長さ約10kmの測線(大原測線と呼ぶ)上の7点でAMT観測を行い、深さ2km付近までの2次元比抵抗構造モデルを求めている。しかし、観測点間隔が広いこと、さらに、観測データに測定装置に起因すると思われる人工的電磁気ノイズの混入が認められる地点があることから、上田らのモデルの信頼性は高いとは言えない。そこで、大原測線上で、上田らの観測点を補完するよう11点の観測点を設け、AMT観測を行った。また、データ解析にRemote reference法(Gamble *et al.*, 1978)を用いるために、北端の観測点から約8km北に離れた人工ノイズが少ない地点に磁場参照点を設けた。

電場、磁場のそれぞれ水平2成分から、Remote reference法に基づいて、10,400~0.35HzのMT応答関数を算出した。モデル計算に先立ち、Phase tensor法(Caldwell *et al.*, 2004; Bibby *et al.*, 2005)を用いて、比抵抗構造の次元と走向を求めた結果、2次元構造であり比抵抗構造の走向はN45°W-S45°Eと求まった。そして、Akaike's Bayesian Information Criterion (ABIC)による平滑化拘束付き2次元比抵抗インバージョンコード(Ogawa and Uchida, 1996)を用いて、深さ2km付近までの2次元比抵抗モデル(OHRモデル)を求めた。

OHRモデルは、1つの高比抵抗領域(R1)と4つの低比抵抗領域(C1~C4)で特徴づけられる。領域C1は大原断層地表トレース直下の地下浅部に、領域C2は地表トレース北東側の地下約1kmに、C3は地表トレース南西側の地下約1.5kmに位置する。

主部北西部では、大原断層と土万断層が併走する部分を横切る測線に沿う2次元比抵抗モデル(OHJモデル;上田, 2011)と、土万断層を横切る測線に沿う2次元比抵抗モデル(HJMモデル; Yamaguchi *et al.*, 2010)が示されている。これらと本研究のOHRモデルで得られてモデルを比較すると、次の3つの特徴が認められた。(1)3つのモデルに共通して、断層地表トレース直下もしくは、併走する地表トレースに挟まれた領域の地下浅部には、顕著な低比抵抗領域が存在する。(2)3つのモデルに共通して、断層地表トレース南西側の深さ1km付近を上面とする低比抵抗領域が存在する。(3)大原断層を横切る2つのモデルには、断層地表トレース北東側の深さ0.5~1.0km付近に低比抵抗領域が存在する。

本発表では、OHRモデルの解釈および山崎断層系主部北西部大原断層から土万断層に至る領域の地下比抵抗構造について発表する

キーワード：活断層、比抵抗構造、山崎断層系、大原断層、地磁気地電流法

Keywords: active fault, resistivity structure, Yamasaki fault zone, Ohra fault, Magnetotelluric method



# 主成分分析を用いたMT探査データ逆解析の信頼度推定

## Reliability estimation of MT-data inversion using principal component analysis

\*小路 久稔<sup>1</sup>、後藤 忠徳<sup>1</sup>

\*Hisatoshi Koji<sup>1</sup>, Tada-nori Goto<sup>1</sup>

1. 京都大学

1. Kyoto University

電磁探査法の一つである Magnetotelluric (MT)法は、資源探査や活断層調査に用いられている。地下の比抵抗構造を推定する際には、MT法によって求められた見掛け比抵抗・位相などに対して逆解析（インバージョン）を行うことが一般的である。推定された比抵抗モデルは、測定時のノイズや、インバージョンを行う上での諸制約のために、真の比抵抗構造とは異なる近似解と言える。従って比抵抗モデルの信頼性の議論は必要不可欠である。従来の研究では、比抵抗モデルの一部を変更した時に見掛け比抵抗や位相にどの程度の変化が生じるかを計算して、比抵抗モデルの妥当性について検証がなされてきた。しかしながら、この検証方法は定性的かつ主観的なものであり、検証の範囲が適切でないという問題がある。本研究ではこのような課題を解決するべく、比抵抗モデルの定量的かつ客観的な信頼度推定法を開発した。

信頼度推定を行う上で、膨大なモデルパラメータのすべてを評価するのは計算時間の制約上不可能であるが、比抵抗モデル中の特徴的な比抵抗異常体について評価することは可能である。そこで本研究では、空間データ中の主要な構造を抽出する際に用いられる主成分分析に着目し、比抵抗異常体の情報の客観的抽出を試みた。具体的には、まず2次元比抵抗モデルを複数の1次元（柱状）比抵抗モデルへ分割し、これらの柱状モデルに対して主成分分析を行う。得られた主成分には横方向に共通する比抵抗構造が表れると考えられる。さらに各主成分得点を段階的に変化させることで、主な比抵抗異常体を移動、拡大縮小、また比抵抗の値の増減を行い、30種類の新たな比抵抗モデルの作成を試みた。新たなモデルから得られる計算値と観測値の残差二乗和の比較に基づいて、比抵抗モデルの変化幅の許容範囲を評価し、信頼度の推定を行った。

本手法の妥当性を検討するため、仮想的なモデル上での合成データ（TEモードの見掛け比抵抗・位相）に対してインバージョンを行い、得られた比抵抗モデルの信頼度推定を行った。例えば高比抵抗体と低比抵抗体の2つの異常体が存在するモデルに対し主成分分析を行ったところ、第一主成分に2つの異常体が強く表れることが明らかとなった。次に、第一主成分の主成分得点を変化させて新たな比抵抗モデルを作成した。鉛直・水平方向にモデルを変化させ、各方向に対する信頼度評価においては、低・高比抵抗体の水平・上下位置、幅、比抵抗の値についての信頼度を可視化できた。得られた信頼度は、従来から指摘されているMT法（TEモード）のインバージョン結果の傾向と一致することが分かった。

さらに、より複雑なモデルに対しても主成分分析および比抵抗モデル改変を行った。その結果、複雑なモデルに対しても異常体が検出されており、また信頼度の評価も可能であった。今後は信頼度推定の範囲を拡大するなど、手法の改良を行い、実データへの適用を行う予定である。

キーワード：MT法、主成分分析、2Dインバージョン

Keywords: magnetotellurics, PCA, 2-D inversion

## MT応答の異常位相に関するマルチ・スペーシング観測

### Multi-spacing MT observation regarding anomalous phase responses

\*岡崎 智久<sup>1</sup>、吉村 令慧<sup>2</sup>、山崎 健一<sup>2</sup>、小松 信太郎<sup>2</sup>、大志万 直人<sup>2</sup>

\*Tomohisa Okazaki<sup>1</sup>, Ryohei Yoshimura<sup>2</sup>, Ken'ichi Yamazaki<sup>2</sup>, Shintaro Komatsu<sup>2</sup>, Naoto Oshiman<sup>2</sup>

1. 京都大学大学院理学研究科、2. 京都大学防災研究所

1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

The magnetotelluric (MT) impedance tensor exhibiting anomalous phases greater than 90 degrees are sometimes observed. Since simple 1D or 2D models do not generate such responses, the appearance of them puts a difficulty on the analysis of MT data. The origin of anomalous phases due to characteristic geo-electric structures has been extensively investigated: some attribute to 3D conductive objects and others to 2D anisotropic structures. On the other hand, noises, imperfection of device or tiny objects near an observation site might induce anomalous phase behavior. Inspecting these possibilities and discriminating them for each data will contribute to improve the interpretation of MT responses.

Anomalous phases were observed at several sites in the observation in western Shikoku (Yoshimura et al, 2016). To exploit more detailed properties, we performed a denser, multi-spacing MT observation around one of the sites showing anomalous responses in that observation. Along with standard MT method measuring three components of magnetic field and two components of horizontal electric fields (3H2E), we measured redundant four components of electric fields (3H4E) at two sites. This is intended to examine the possibility of device or tiny objects.

The estimated response functions show the reproducibility of anomalous responses irrespective of the arrangement of electrodes, which confirms that the cause is different from device or tiny objects. Responses at different sites impose some restrictions on the spatial distribution where anomalous phases appear at this region, and we discuss the origin of anomalous responses.

キーワード：MT法、異常位相

Keywords: MT method, anomalous phase

## 直流電流により生じる岩石試料表面の電位イメージング DC potential imaging of a granite surface

\*鈴木 健士<sup>1</sup>、吉村 令慧<sup>2</sup>、山崎 健一<sup>2</sup>、大志万 直人<sup>2</sup>

\*Takeshi Suzuki<sup>1</sup>, Ryohei Yoshimura<sup>2</sup>, Ken'ichi Yamazaki<sup>2</sup>, Naoto Oshiman<sup>2</sup>

1. 京都大学大学院理学研究科、2. 京都大学防災研究所

1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

岩石試料(~10 cm)の電気比抵抗構造を明らかにすることは、地球物理学的観測によって得られた結果を正しく解釈するために重要であるが、同時に難しいとされてきた。岩石試料に電流を印加して、その表面に生じた試料表面の電位分布を面的に測定することができれば、岩石試料内部の比抵抗分布を求めることができる。しかし、高抵抗な岩石試料に十分な電流を印加すること自体が難しい。また、その際に、漏えい電流を防ぐことも難しい。さらに、高い導通性能を保ちながら試料側面に高密度で接着・配置できる電極素材は少ない。以上の理由から、岩石試料の電位分布測定は実現していなかった。

我々は、測定手法を工夫することで、直流電流により生じる花崗岩表面の電位分布測定を試みた。まず、高抵抗な岩石試料の電位測定を実現するため、高入力インピーダンスのエレクトロメーターを用いた。また、測定中の漏えい電流を防ぐため、シグナルグランドとアースを電氣的に分離するフローティング測定と呼ばれる計測方法を用いた。そして、試料表面への高密度な電極配置を実現するため、導電性エポキシ樹脂を点電極として用いた。

上記の方法を用いて、花崗岩試料に電流を印加し、その表面電位分布を面的に測定した。得られた電位分布は数値計算の結果と大雑把にはあるが一致した。従来困難だと考えられてきた岩石試料の比抵抗分布推定の実現可能性を示す結果だと言える。

キーワード：岩石の電気比抵抗、室内実験、高入力インピーダンスのエレクトロメーター、フローティング測定、導電性エポキシ樹脂

Keywords: electrical resistivity of rocks, laboratory tests, electrometer with extremely high input impedance, floating measurement, conductive epoxy

# 地熱地域岩石コアの室内透水試験における電気インピーダンス測定

## Electrical impedance measurement of geothermal reservoir rock under fluid-flow test

\*澤山 和貴<sup>1</sup>、北村 圭吾<sup>2</sup>、藤光 康宏<sup>3</sup>

\*Kazuki Sawayama<sup>1</sup>, Keigo Kitamura<sup>2</sup>, Yasuhiro Fujimitsu<sup>3</sup>

1. 九州大学大学院工学府地球資源システム工学専攻、2. 九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所、3. 九州大学大学院工学研究院地球資源システム工学部門

1. Department of Earth Resources Engineering, Graduate school of engineering, Kyushu University, 2. International Institute of Carbon Neutral Energy Research, Kyushu University, 3. Department of Earth Resources Engineering, Faculty of engineering, Kyushu University

地熱資源の持続的な利用を可能にするためには、枯渇した地熱貯留層への人工涵養法 (Enhanced Geothermal System; EGS) の開発が不可欠である。このEGSを行う上では、地下深部の貯留層における熱水飽和度の推定が極めて重要であり、近年、Magnetotelluric (MT)法を用いた比抵抗構造探査の適用が注目されている。MT法では、低周波数帯域のインピーダンス特性を調べることで地下深部の情報を得ることができるが、電気インピーダンスと水飽和度の相関を調べた研究は少ない。本研究では、地熱貯留層を構成する岩石の水飽和度と電気インピーダンスの関係を実験的手法によって明らかにすることを目的とし、岩石コアの室内透水試験を行った。サンプルは、人工的に亀裂を生成した安山岩 (牧園溶岩, 空隙率11%) の円柱コア (直径35 mm, 長さ70 mm) を用い、封圧20 MPa, 温度25 °Cの条件下で透水試験を行った。このサンプルにリボン状のAg-AgCl電極と圧電素子を取りつけることで、透水試験中の電気インピーダンス (測定周波数 $10^{-2}$ - $10^5$  Hz) と弾性波速度を測定している。実験は、はじめに過熱蒸気を模擬した窒素ガス (間隙圧10 MPa) で空隙を充填させたのち、模擬地層水 (1 wt-% KCl溶液, 電気伝導度1.75 S/m) を一定圧力 (11, 12, 14, 16, 18 MPa) で注入した。この空隙の窒素-塩水置換によって水飽和度を変化させている。安山岩を用いて実験を行った結果、塩水注入前の電気インピーダンスは $10^5$  Ωのオーダーであったのに対し、注入後の電気インピーダンスは $10^3$  Ωのオーダーと2桁ほど減少した。この顕著な電気インピーダンスの減少は、岩石中にあらかじめ注入していた窒素ガスが、注入した塩水によって置換されたためであると考えられる。また、注入圧力の上昇に伴い、電気インピーダンスには系統的な減少が確認され、注入水圧が18MPaのときでは、11MPaのときに比べて40%ほど減少した。注入水圧をステップ上昇させて増圧過程を調べた後、注入水圧を下降させていく減圧過程においても同様の測定を行った。その結果、減圧過程のときの電気インピーダンスは、増圧過程における同じ注入水圧のものに比べやや小さい傾向にあり、注入水圧が11 MPaのときでは27%ほどの減少が確認された。一方で、同時に測定していたP波速度は、注入水圧の変化によってほとんど変化しなかった。これは、減圧過程の微小な水飽和度の変化に対して、電気インピーダンスは敏感に反応したが、P波速度ではこの変化を感知できなかったことを示している。これらの結果から、電気インピーダンスは、P波速度に比べて微細な水飽和度の変化に対する感度が高いことが明らかになった。このことは、地熱貯留層における緩やかな水飽和度の変化が、電気インピーダンスによってモニタリング出来る可能性を示唆している。

キーワード：電気インピーダンス、弾性波速度、水飽和度、透水試験、EGS (地熱涵養系)

Keywords: electrical impedance, elastic wave velocity, water saturation, fluid-flow test, EGS (Enhanced Geothermal System)

## 摩擦すべりしている模擬断層の接触状態をモニターするための電気伝導度連続測定

### Continuous measurement of electrical conductivity for monitoring contact state of simulated fault during frictional sliding

\*山下 太<sup>1</sup>、福山 英一<sup>1</sup>、溝口 一生<sup>2</sup>

\*Futoshi Yamashita<sup>1</sup>, Eiichi Fukuyama<sup>1</sup>, Kazuo Mizoguchi<sup>2</sup>

1. 国立研究開発法人防災科学技術研究所、2. 一般財団法人電力中央研究所

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Central Research Institute of Electric Power Industry

室内実験において、すべっている模擬断層の力学的パラメータを他の観測量とともにモニタリングすることは、岩石の摩擦特性については地震の動力学を理解する上で貴重な情報をもたらす。この観点から、我々はすべり面上の接触状態をモニターできる可能性のある断層の電気特性に着目した。円柱形のインド産変はんれい岩一組を実験試料として用い、それらを防災科学技術研究所が所有する高速回転せん断摩擦試験機に設置した。この試験機はスリップリングを介することで回転中であっても回転側試料のセンサーから電気信号を取り出すことができる。直径25 mmで長さ30 mmの試料を2個重ねて実験に用いた。乾燥岩石試料の極めて高い抵抗値を測定するために、最大入力インピーダンスが200 TΩである2台のエレクトロメーター (Keithley 6514) を使用した。1台のエレクトロメーターによって模擬断層を横切る直流電流を入力し、もう1台によって断層間の電位を測定した。まず我々は模擬断層の電気的特性を把握するため、静的状態での予備実験をおこなった。急激な電流の入力に対して電位が過渡的な応答を示すことから、接触している断層は抵抗素子とコンデンサー素子の並列回路と見なすべきであることが明らかとなった。この過渡応答より、垂直応力が0.1 MPaから8 MPaにおける断層の抵抗およびキャパシタンスの値を推定したところ、垂直応力が高くなるにつれ抵抗が減少しキャパシタンスが増加していることがわかった。このことは、真の接触部とその他の部分（非接触部）がそれぞれ抵抗素子とコンデンサー素子として機能していると仮定すれば、高い垂直応力によりアスペリティの真の接触が増加する一方でアスペリティの高さが減少しているためと解釈できる。したがってこの実験結果は、アスペリティの電気伝導度（比抵抗の逆数）が一定である限り、抵抗とキャパシタンスの測定値から真の接触面積を見積もることが可能であることを示唆している。次に我々は、準地震すべり速度 ( $5.3 \times 10^{-3}$  m/s) で垂直応力が3 MPaの条件下における断層の電気伝導度モニタリングをおこなった。この条件下で、せん断応力と垂直応力の比で定義される摩擦係数は典型的なすべり弱を示した。すなわち、すべりが始まると同時に0.8まで上昇した後0.2まで低下し、その後は0.2と0.6の間で変動した。電気伝導度データは摩擦強度と非常によく似た変動を示し、摩擦係数が増加した際には電気伝導度も増加した。さらに、測定した電気伝導度データより、すべりにともなう真の接触面積およびその強度の変化を推定した。その結果より、初期のアスペリティはすべり弱のごく初期の段階で完全に破壊され、その後のガウジの粉碎フェイズの方がすべり弱プロセスにおいてはより支配的であることが示唆された。我々はさらに地震性すべり速度 (1 m/s) で垂直応力が3 MPaの条件で同様の実験をおこなった。この条件下では、断層の岩石は摩擦熱によって熔融し、その強度を大きく失うことが知られている。Hirose and Shimamoto (2005)は弱プロセスが、2つの弱化ステージとその間の1つの強化ステージからなり、それらは摩擦熔融中のメルトパッチの生成とその後の熔融層の成長に関連していると報告している。我々の電気伝導度モニタリングはその2つの弱化ステージにおける急激な伝導度の上昇を示し、定性的ではあるが明瞭にそれらのプロセスを確認することに成功した。以上の結果は、電気伝導度がさまざまなすべり速度ですべっている断層の接触状態を明らかにする優れたツールであることを示している。

キーワード：電気伝導度、摩擦実験、断層、アスペリティ

Keywords: Electrical conductivity, Friction experiment, Fault, Asperity